

液膜の波状化による凝縮伝達の促進：寸法効果

著者	寺西 恒宣, 小澤 貴敬, 瀧本 昭
雑誌名	日本冷凍空調学会論文集 = Transactions of the Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers
巻	19
号	3
ページ	237-244
発行年	2002-10-15
URL	http://hdl.handle.net/2297/29503

液膜の波状化による凝縮伝熱の促進 — 寸法効果 —

Enhancement of Condensation Heat Transfer by Counter-Corrent Wavy Flow in a Vertical Tube — Scale Effect —

寺 西 恒 宣*
Tsunenobu TERANISHI

小 澤 貴 敬**
Takanori OZAWA

瀧 本 昭***
Akira TAKIMOTO

* 富山工業高等専門学校機械工学科 (939-8630 富山市本郷町13)

Department of Mechanical Engineering, Toyama National College of Technology
(13 Hongo, Toyama 939-8630)

** 金沢大学大学院自然科学研究科 (920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University
(2-40-20 Kodatsuno, Kanazawa 920-8667)

*** 金沢大学工学部人間・機械工学科 (920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

Department of Human and Mechanical System Engineering, Kanazawa University
(2-40-20 Kodatsuno, Kanazawa 920-8667)

Summary

As a basic research for the development of a high-performance and environment-friendly thermal energy recovery system, detailed experiments have been conducted to investigate the mechanism of the enhancement of condensation heat transfer by the counter-current moist air flow in a vertical tube. From the results of visual observation of the phenomena by using a high-speed video recorder and the measurement of condensate rate respectively from an upper and a bottom end of a cooled tube, in which various humidity vapor of air and water flowed upward or downward, the dynamic behavior of liquid film condensed on cooled surface and moist air flow was classified into four distinctive patterns in quality and quantity. Further, the effect of the scale and the operating condition such as the diameter and the length of tube, the vapor concentration and the moist air temperature, on the condensation rate of counter-current wavy flow was clarified in relation to the pattern and condition of occurrence of the wavy flow of liquid film and flooding due to the shear forces between the interface of liquid and moist air flow.

Key words : Condensation, Moist air, Counter-current flow, Heat transfer enhancement, Scale effect

1. 緒言

微小粒子やCO₂などの各種汚染ガスを含む排ガスの分離・回収の高効率化は環境問題解決のためのキーテクノロジーである。著者らはこの

解決策の一つとしてガス吸収・回収の高効率化を目的に、“ミスト化を利用した凝縮式ガス吸収方式”を提案し、理論的・実験的追究によりその有効性を明らかにしてきた¹⁾。この方式では、溶質ガスを含む高温の湿り空気を冷却面と接触させ混

合気中の水蒸気分子により凝縮液膜を形成し、同時に気流と液膜表面間のガス濃度差をポテンシャルとしてガス分子を拡散輸送するものである。液膜表面が凝縮により更新され常に高いガス濃度ポテンシャルが維持されること、および液相内でのガス濃度分布の均一化が生じることにより、ガス吸収が気相内ガス拡散律速となり、液相内拡散律速の従来法である流下液膜方式に比べて数倍ガス吸収速度が促進されるとともに、回収液の後処理も軽減できるところに大きな特徴がある。しかし、その一方では、ガス吸収速度が排ガス中に含まれる水蒸気の冷却面への凝縮速度に依存するため、ガス吸収量には限界がある。すなわち、さらなる本方式の効率向上には凝縮速度の促進法の追究が必要と言える。

以上の観点から、前報²⁾では、湿り空気凝縮伝熱促進を目的に鉛直冷却管内へ円管下端部から液膜流とは逆に上向きに高温湿り空気流を流入させ、液膜の波状・乱流化ならびに噴霧化による凝縮伝熱の促進効果について追究を行った。その結果、気流せん断力により液膜の不安定波状流あるいは上昇液膜流が出現し凝縮伝熱が促進されることが凝縮液の動挙動と関連づけて明らかにされた。また、圧力損失の測定を行い、液膜の波状化のために要したポンプ動力とそれによる伝熱促進量の比較から、本方式がエネルギー効率の上からも有効であることが明らかにされた。本報は、これらの成果をもとに、さらに、管内に形成される凝縮液の動挙動と熱伝達特性に及ぼす操作条件や管寸法の影響について追究したものである。

これに関する従来の研究として、蒸気が鉛直上向きに流れる系については気流速度が大きく重力の影響を無視できる範囲において下向き流と同様に扱われ、Sebanら³⁾、Panら⁴⁾により理論的に追究されているが、いずれも層流液膜を仮定し凝縮液の様相や動挙動の詳細は言及されていない。実験的には、Thummら⁵⁾による気液界面せん断力が凝縮熱伝達に及ぼす影響のほか、泉ら⁶⁾や伊藤ら⁷⁾による管内流動様式の違いから下向き流より上向き流の方が凝縮熱伝達率が大きくなる場合もあることが報告されている。一方、管内を液膜と気流が対向して流れる系の流動特性に関する研究は、気液二相流の分野に

おいて数多く行われている^{8)~11)}。その結果、重力と気液界面せん断力のバランスから液膜の波状化やフラッディング現象、さらには液膜の分裂による飛散滴の発生、液体プラグの形成による液膜の脈動現象や逆流現象などが生じることが明らかにされている。しかしながら、凝縮・気液二相流のいずれの分野においても鉛直冷却管内を高温湿り空気が上向きに流れる場合の液膜の動挙動と、それと関連づけた凝縮伝熱特性について未だ一般性をもって議論されるには至っていない。

記号

C	: 水蒸気の質量濃度	[kg/m ³]
d	: 冷却管内径	[m]
h	: 平均熱伝達率	[W/m ² K]
h_{fg}	: 凝縮潜熱	[J/kg]
L_c	: 冷却部長さ	[m]
m	: 凝縮量	[kg/m ² s]
m_d	: 冷却管下端からの流出量	[ml/s]
m_u	: 冷却管上端からの流出量	[ml/s]
q	: 平均熱流束	[W/m ²]
T	: 温度	[K]
ΔT	: 温度差	[K]
U	: 流速	[m/s]

添字

g	: 空気
in	: 冷却管入口
L	: 液体
w	: 冷却管壁面
upward	: 上向き流
downward	: 下向き流

2 実験装置および方法

Fig.1に実験装置の概要を示す。装置は大別して、混合蒸気を所定の条件に調温調湿する蒸気供給系、冷却円管を鉛直にセットした試験主要部、およびその他の計測機器から構成される。蒸気供給系では、レギュレータおよび流量計により一定流量に調節されたコンプレッサーからの空気が予熱され、ボイラからの水蒸気と混合された後、助走部でさらに調温調湿され、所定の条

件にコントロールされた混合蒸気となり、試験主要部の鉛直冷却管内にバルブの切り替えにより上部あるいは下向きに流入し凝縮する。冷却管の出入り口には乾湿熱電対を取り付け、混合蒸気の温度・濃度が測定される。試験主要部は冷却管内部の凝縮様相の観察を可能にするためガラス管と透明アクリルパイプとの二重円管構造とし、一定温度にするためその間に恒温水槽からの冷却水が循環する（以後、この区間を冷却部と呼ぶ）。冷却管外壁には軸方向50mm間隔に銅－コンスタンタン型熱電対が取り付けられ、これらの平均温度から冷却部壁面温度 T_w を算出している。

実験は、鉛直に設置された冷却管内に上向きあるいは下向きに流入する空気－水混合蒸気流を対象に、定常状態のもと冷却管上下端から流出する凝縮液量の測定と高速度カメラによる凝縮液の様相観察および圧力損失の測定を行った。実験条件としては、冷却管入口蒸気温度が $T_{in}=60$ ℃一定で、水蒸気の質量濃度が $C_{in}=0.10\text{kg/m}^3$ （相対湿度77.5%）、気流速度が $U_g=2\sim 8\text{m/s}$ 、冷却管壁面温度が $T_w=10\sim 50$ ℃の範囲とした。冷却管には、冷却部長さ L_c (mm)×内径 d (mm)が $500\times\phi 12$, $500\times\phi 10$, $500\times\phi 8$ および $250\times\phi 12$, $250\times\phi 10$, $250\times\phi 8$ の6種類のガラス管（いずれも肉厚1mm）を供試した。

3 結果と考察

3.1 凝縮液の動挙動と分類

高温湿り空気が鉛直冷却管内を下向きに流れる場合、水蒸気は壁面上に膜状に凝縮し、それに気流せん断力の作用により凝縮液は加速され流下し全て管下端から流出する。その動挙動はいずれの寸法の供試管についても同様である。高温湿り空気が上向き流の場合、凝縮液に作用する重力方向と気流方向が対向するため、Fig.2に示す高速度ビデオ写真とそのスケッチからわかるように、気流速度の増加とともに増大する気液界面でのせん断力により凝縮液には厚い部分と薄い部分が軸方向に出現し、それが上下に脈動しながらさらにある波高になると噴霧化するフラッディング現象が観察される。気流温度と等温の液膜が管上方から一定流量で流下し気流

と対向する等温二相流の研究結果では、液膜流下速度が最も速く液膜表面が不安定となる管下端部でフラッディングが生じ易いのに対し、気液間に温度差があり凝縮を伴う本研究の場合では、液膜厚さがフラッディングや脈動流の影響を受け変化し、さらにその液膜厚さの熱抵抗に

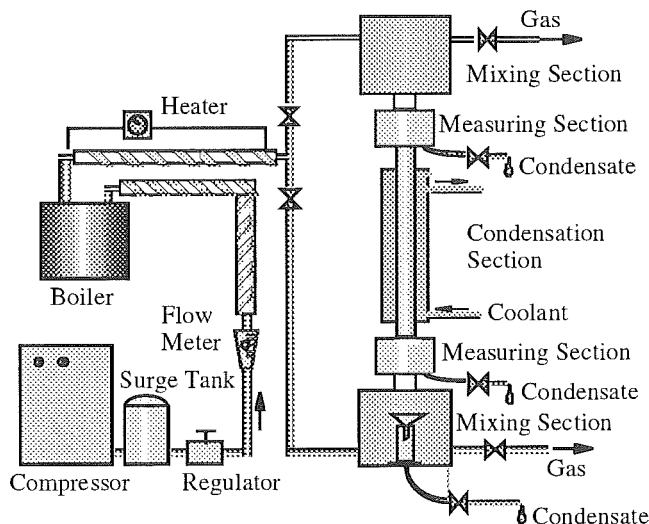


Fig.1 Experimental apparatus

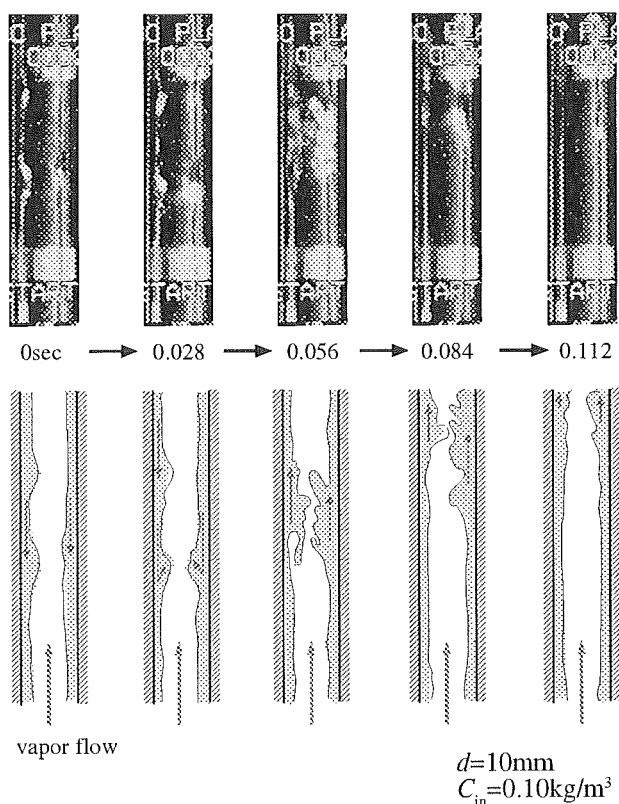


Fig.2 High-speed photography and the sketch of an instant of the occurrence of flooding-flow

応じて新たに凝縮が進行するため、管内のいたる部分でフラッディングや液膜流の脈動が生じているものと考えられる。このように凝縮液膜は水蒸気の質量濃度・温度および気流速度により様々な挙動を示すが、特に、管寸法の影響として、冷却管の内径が細いほど凝縮液が管内を閉塞し周期的にプラグ状態となりその後液を管上端部から噴出する様相が観察された。プラグ状態後に噴出した凝縮液は、冷却管が短い場合、管上端までストレートに上昇して管外へ放出され

管内でのプラグ状態や脈動も少ない傾向にあるが、冷却管が長い場合には途中まで上昇し勢いが無くなったのち流下して戻り再び同様の周期をくり返す傾向を示す。

Fig.3に冷却管上下端から流出する単位時間当たりの凝縮液量 m_u , m_d と気流速度 U_g の関係をそれぞれの管寸法について示す。いずれの温度差 $\Delta T = T_{in} - T_w$ においても、気流速度が比較的遅い条件下では凝縮液は下端部からのみ流出し ($m_d > 0$, $m_u = 0$)、気流速度の増加とともに上端部からも流

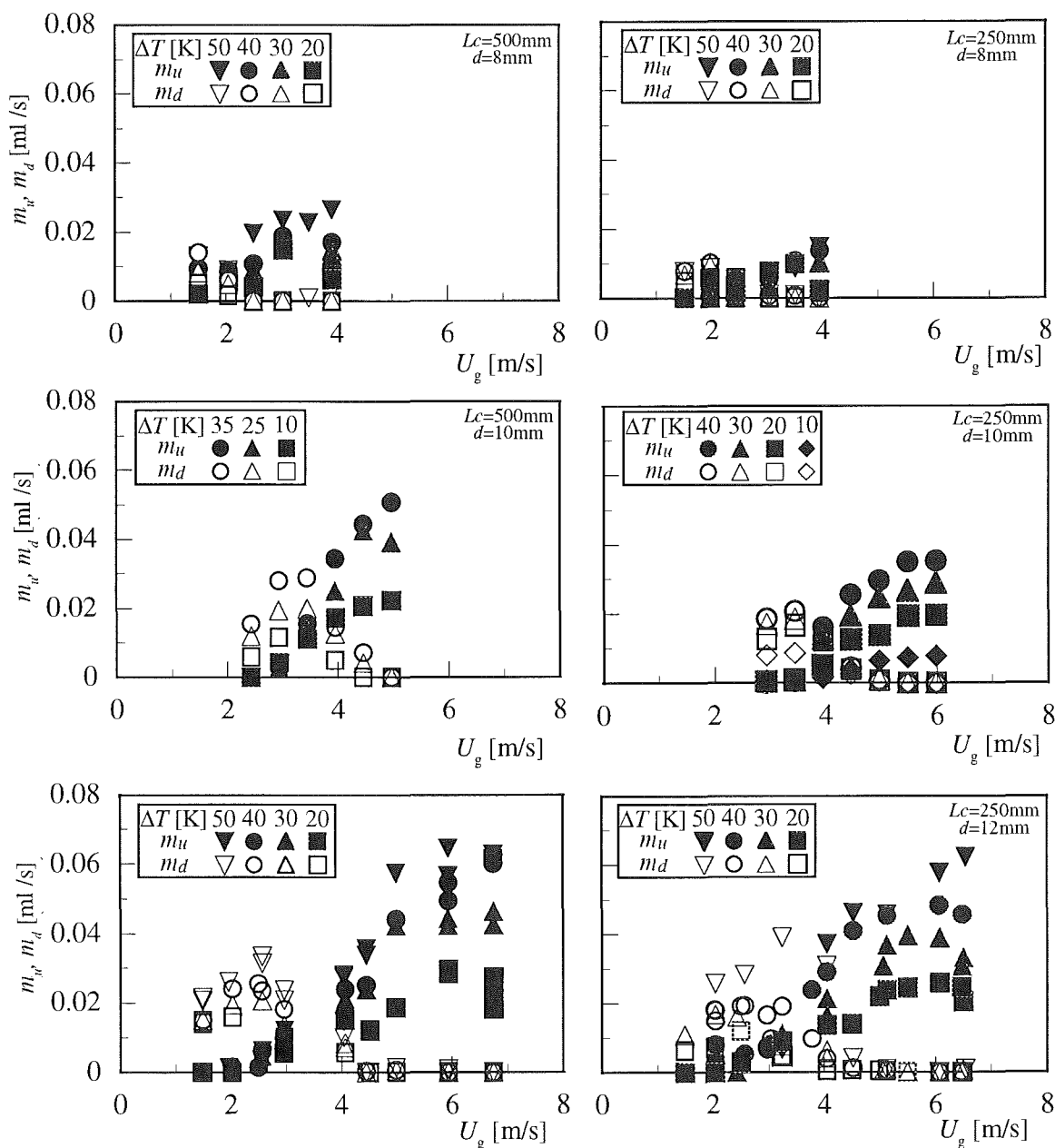


Fig.3 Condensate rate from the each tube end (upward flow)

出しはじめ ($m_d > 0, m_u > 0$), ついには全ての液が管上端部から流出する ($m_d = 0, m_u > 0$). 脈動を伴う凝縮液様相の観察結果と凝縮液の流出方向の測定結果から, 上向き流における凝縮液の様相は次の4つのパターンに分類できる.

Aパターン: 凝縮液は鉛直下向きに膜状に流下し, 全ての液膜が管下端部から流出する.

Bパターン: 波状化した凝縮液の逆流が現れ部分的にフラiddینگが生じる. 凝縮液は管下端部からも流出するが, 管上端部からもフラiddینگによって気流中に飛散した凝縮液が流出する.

Cパターン: フラiddینگや液膜の脈動現象が管内全域で頻繁に現れ, 飛散滴も含め全ての凝縮液が管上端部から流出する.

Dパターン: 全ての凝縮液が管上端部から流出するが, 液膜の脈動をほとんど生じない.

Fig.4に, 冷却管上下端から流出する凝縮量の変化 (Fig.3) から定量的に求めたA→B, B→C各パターンへの遷移速度を温度差をパラメータに管寸法との関係で示す. これより, 内径が比較的太い場合, それぞれの遷移速度は内径によらずほぼ一定となるが, 内径が細くなるに従いより低速で遷移しはじめることがわかる. また, 冷却管が長いほどわずかなではあるが低速で遷移し

はじめる. 温度差の影響についても温度差の大きいほど低速側で遷移している. 冷却管が長くなるほど下方の液膜厚さが増加することおよび温度差の増加による凝縮量の増加のほか冷却管の内径が細くなることにより, 凝縮液膜の管断面積に占める割合, すなわち閉塞率が大きくなるため気流の実流路断面積が小さくなり気流速度が加速し気液界面でのせん断力が増加することによるものと考えられる. なお, C→Dパターンへの遷移条件は冷却管上下端から流出する凝縮量の変化から定量的に求めることができないため, VTR撮影や肉眼などによる観察から求めた (同図★). その結果, 本実験範囲ではCパターンからDパターンへは温度差や管寸法に関わらず $U_g = \text{約 } 7 [\text{m/s}]$ 付近から遷移し始めることが得られた. しかしながら, 温度差や管寸法の影響をより明らかにするため, 液膜の脈動についてさらに定量的に追究していくことが必要である.

3.2 凝縮熱伝達

Fig.5に平均熱流束と気流速度との関係を管寸法ごとに示す. 平均熱流束 q は単位時間単位伝熱面積当たりの全凝縮量 $m = (m_u + m_d) / (\pi d L_c)$ と凝縮潜熱 h_{fg} の積 $q = m h_{fg}$ として算出し, 平均熱伝達率は $h = q / (T_{in} - T_w)$ で定義した. 図中の実線は下向き流における実験結果の近似式である ($q = 550 d^{1/2} U_g^{3/4} \Delta T^{4/5} L_c^{-1/2}$). 実験値は若干ばらつきがあり近似式と必ずしも正確に一致していないもの

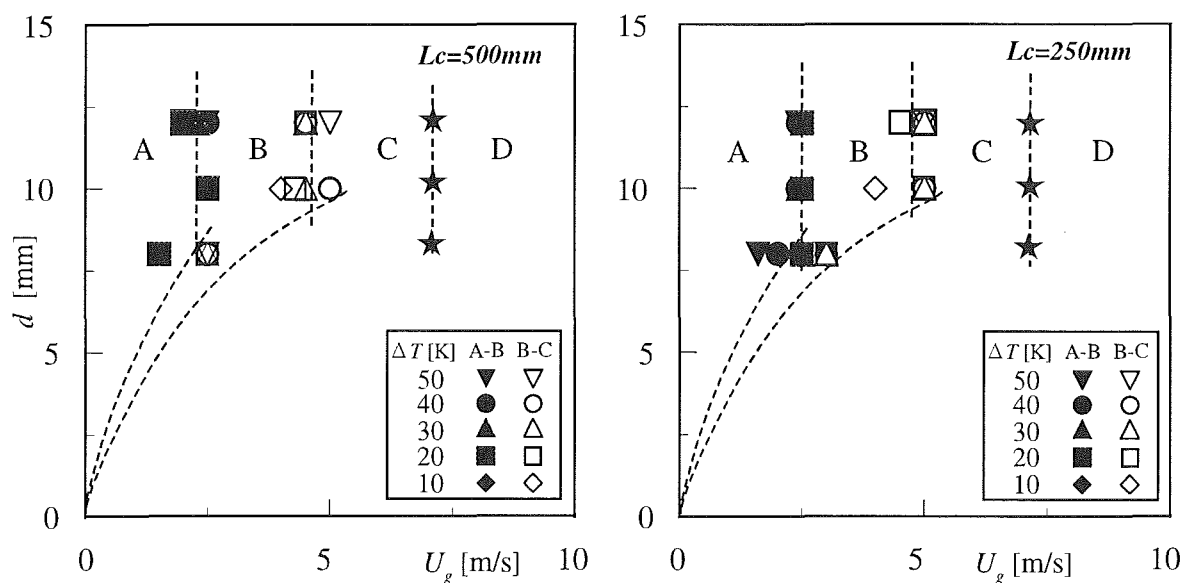


Fig.4 Critical condition of each pattern

の本実験範囲において近似式は下向き流における平均熱流束の傾向を比較的良好に表していると言える。一方、上向き流の結果は、気流速度が遅い条件下では気流速度が速くなるほど、また、温度差が大きくなるほど平均熱流束は増加するが、ある流速でピークをとった後減少していく傾向を示す。下向き流と上向き流の比較において、低流速、小温度差では気流の方向によらず両者はほぼ同一の値をとるが、流速や温度差の増加に伴い両者に差異が生じていることがわかる。

このような鉛直冷却管内強制対流凝縮熱伝達

に及ぼす気流方向の影響をそれぞれの管寸法に対する凝縮様相と関連づけて明らかにするため、Fig.6に下向き流に対する上向き流の熱伝達比、即ち伝熱促進比 $En(=q_u/q_d=h_u/h_d)$ と気流速度の関係を示す。 q_d には前述の近似式を用いた。 En の値が1以上であれば($En \geq 1$)、上向き流にすることによって凝縮熱伝達が促進されることを表している。本実験範囲においては、 $L_c=500[\text{mm}]$ の $d=8,12[\text{mm}]$ ではあまり大きな伝熱促進効果は得られていないが、 $d=10[\text{mm}]$ では U_g ：約6[m/s]、 $\Delta T=20 \sim 40\text{K}$ において最大約2倍もの伝熱促進比

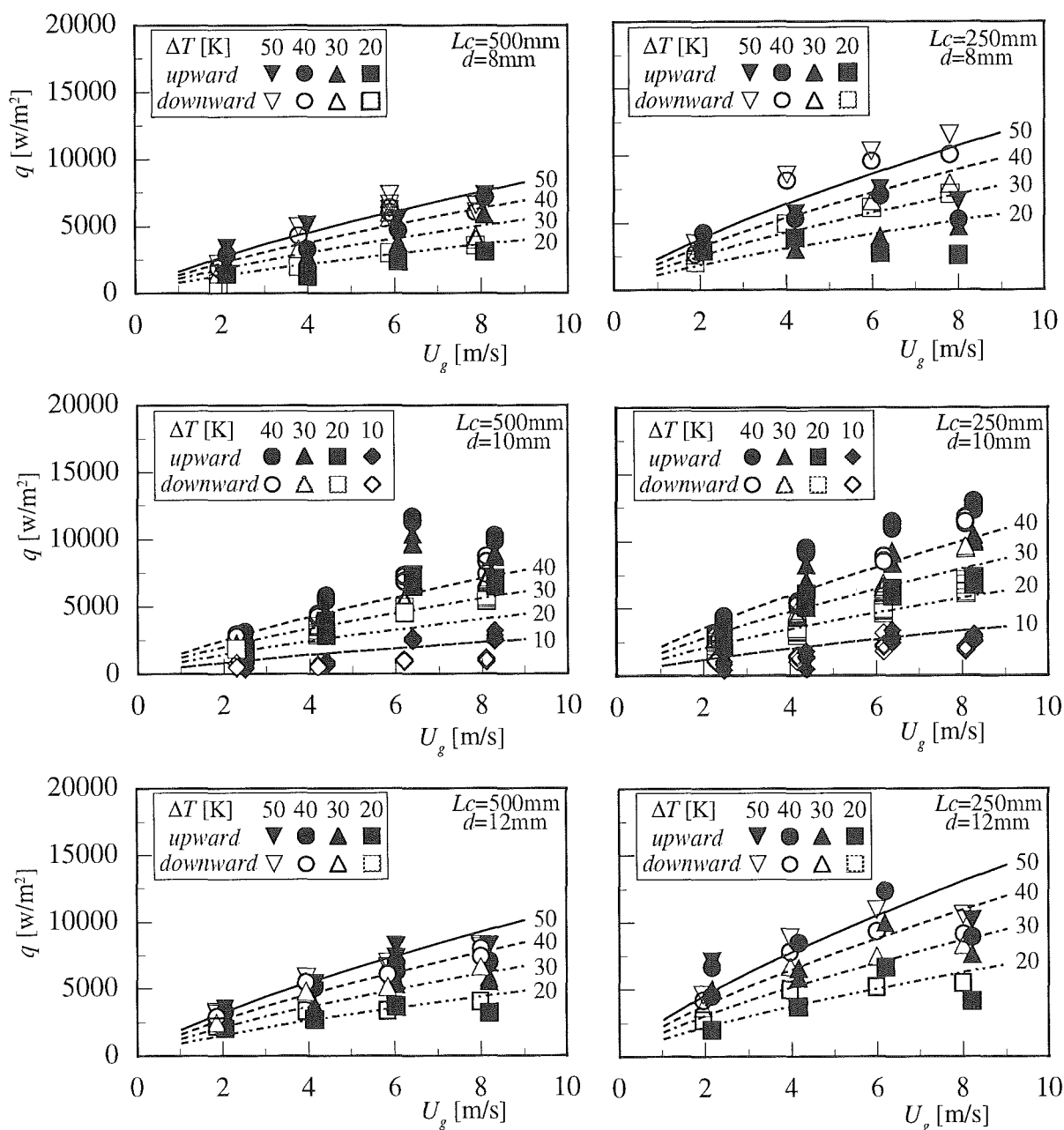


Fig.5 Condensation heat flux

が得られている。 $L_c=250[\text{mm}]$ では ΔT や U_g 条件は異なるが $d=8,10,12[\text{mm}]$ 全ての内径についても最大約1.5倍の伝熱促進効果が現れている。いずれもBパターンからCパターンへの遷移過程あるいはCパターンの状態で大きな伝熱促進効果が得られている。このことは凝縮液の動挙動と関連づけて次のように考えられる。すなわち、それぞれの管寸法において主流蒸気と冷却面の温度差が一定の場合、比較的気流速度が遅いAパターンでは、重力方向に流下する凝縮液に気流せん断力が対向して働くため液膜が厚くなり、

熱伝達率は下向きに比べ低下するものと考えられる。しかし、気流速度が速くなるにつれて管内でフラッシングや液膜流が上下に脈動する現象が現れ(B, Cパターン) 熱伝達率が促進され、さらに気流速度が速くなり気液界面のせん断力が支配的となるDパターンでは凝縮液の脈動が少なくなり液膜の流れ方向と気流方向が同じになっていくため、熱伝達率は下向き流の場合と同様の傾向を示すものと考えられる。このように伝熱促進比は凝縮液の動挙動パターンと密接に関連し、その動挙動パターンは気流速度と温

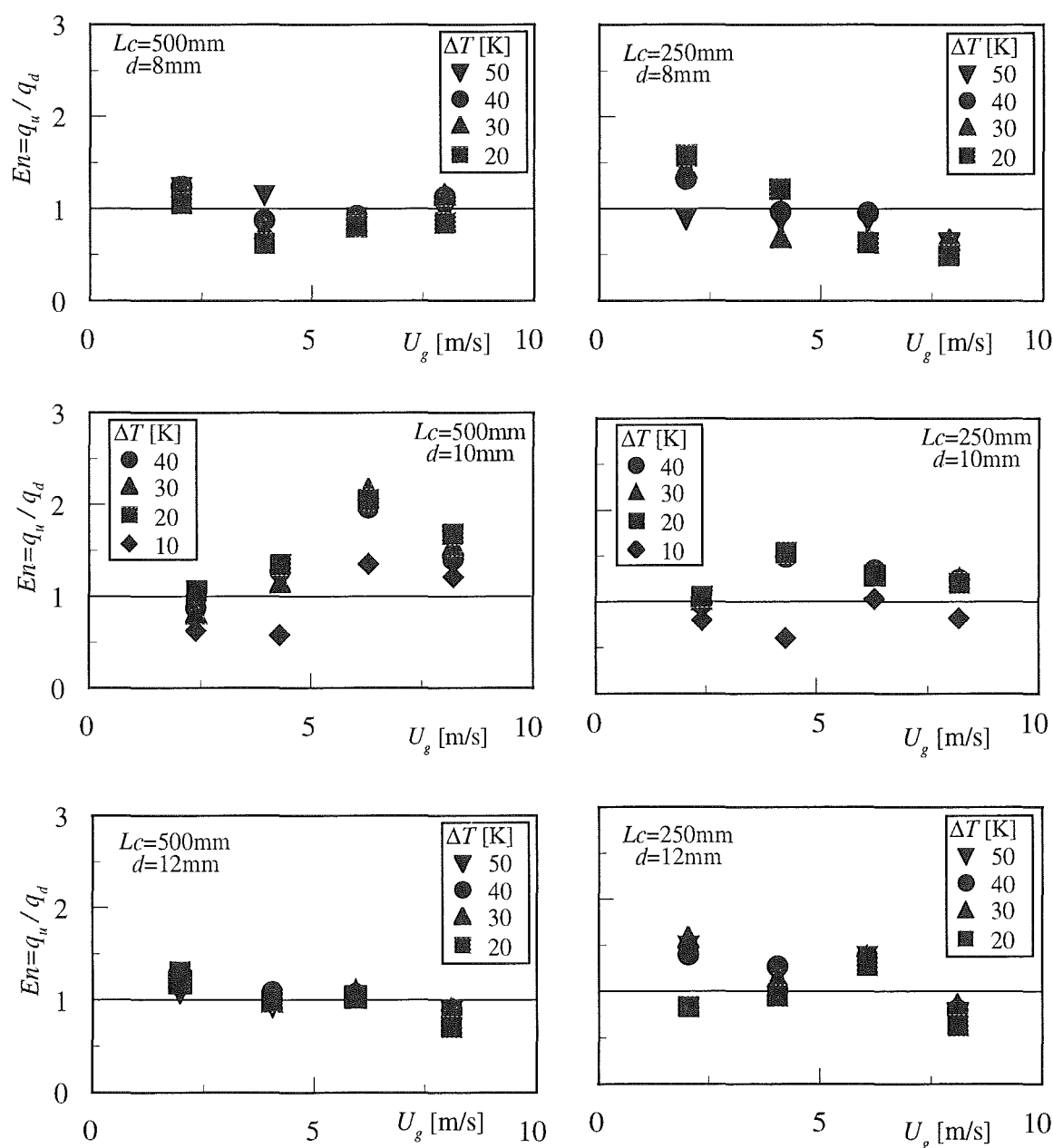


Fig.6 Enhancement of condensation heat transfer

度差に大きく支配される。従って、管寸法や気流速
度が同じであっても温度差のわずかな変化に
より凝縮液が異なる動挙動パターンを呈するた
め、伝熱促進比はFig.6のように各管ごとに様々
な傾向を示すものと言える。

以上、本研究で対象とする比較的空氣を多く
含む湿り蒸氣の熱・物質移動の促進において、こ
れまで上向き流にすることは気流せん断力のた
め液膜が厚くなり伝熱的にはマイナス要因であ
るとされてきたが、凝縮液の波状化や脈動・フ
ラッディングなどによる液膜の攪拌や分裂・飛
散滴の発生などによりトータルとして大きな伝
熱促進効果を得ることが可能であり、さらにそ
の最適条件は、凝縮液膜の管断面積に占める閉
塞率と関連し、Fig.4に示す凝縮液の動挙動パ
ターンの遷移条件から内径がある程度細くな
るとより小さな気流速で得られることが示唆さ
れる。

4. 結 論

凝縮液膜の波状化を利用したガス吸収の促進
メカニズムを解明する一環として高温湿り空氣
の凝縮伝熱促進を目的に、鉛直冷却管内へ上向
きに空氣-水混合蒸氣を流入させ、管内に形成
される凝縮液の動挙動と熱伝達特性に及ぼす操
作条件・管寸法の影響について実験的に検討を
行った。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 凝縮液の動挙動パターンの遷移条件 (A-B,
B-C への遷移条件) に及ぼす管寸法の影響が明
かにされた。
- (2) 液膜の波状化による凝縮伝熱の促進に及ぼ
す管寸法の影響が凝縮液の動挙動と関連づけて
明らかにされた。
- (3) 伝熱促進比が最大となる条件が管寸法と操
作条件の関係において存在することが示唆され
た。

文 献

- 1) O. Matsuda, H. Kohigashi and A. Takimoto: Ther-
mal Science & Engineering, **8**(6), 1(2000) .
- 2) T. Teranishi, T. Ozawa, K. Imai and A. Takimoto:
Thermal Science & Engineering, **9**(6), 39(2001).
- 3) R. A. Seban and J. A. Hodgson: Int.J.of Heat Mass
Transfer, **25**, 1291(1982).
- 4) Y. Pan: Int.J.of Heat Mass Transfer, **44**, 4475(2001).
- 5) S. Thumm, Ch. Philipp and U. Gross: Int.J.of Heat
Mass Transfer, **44**, 4245(2001).
- 6) 泉亮太郎, 石丸典生, 小沢通曜, 山口誉起: 冷
凍, **51**(589), 951(1976).
- 7) 伊藤正昭, 小林千恵, 原利次, 柴山昌幸, 功
刀能文: 冷論, **11**(3), 329(1994).
- 8) 植田辰洋: 「気液二相流」, 養賢堂, 東京 (1973).
- 9) 藤井照重, 赤川浩爾, 伊藤裕: 「気液二相流の動
的配管設計」, 日刊工業社, 東京 (1999).
- 10) 柴田裕一, 神永文人, 斎藤孝基: 機論, **61**(587B),
2655(1995).
- 11) J. R. F. Guedes de Carvalho and M. A. R. Talai:
Chemical Engng. Science, **53**(11), 2041(1998).